

Коррозия – биотехническая система разрушения технических объектов, снижающая их качество и надежность

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Кудина¹⁾, И. О. Соколов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Общеизвестно, что коррозия материалов, как явление в природе, носит многогранный характер, где ее зарождение и развитие во многом зависят от микрофлоры окружающей среды. В современном мире коррозия рассматривается в основном как самопроизвольное разрушение твердых тел, вызванное химическими и электрохимическими процессами, развивающимися на поверхности тела при его взаимодействии с внешней средой. Сущность коррозионного разрушения объектов следует изучать в аспекте взаимосвязанных природных явлений и процессов, которые постоянно протекают при контакте объекта с техногенными средами и окружающей средой, содержащими множество микроорганизмов различных родов и видов. Накопление и метаболизм микроорганизмов в поверхностных дефектах твердых тел при создании в контактных зонах благоприятных физических, химических и биологических условий создают участки биоценоза, в которых образуются метаболиты, биогенные элементы и химически активные радикалы, взаимодействующие с контактной поверхностью тела и техногенной средой. Такое взаимодействие порождает протекание на контактных поверхностях как биохимических реакций в микробных клетках, так и биоэнергетических механизмов преобразования энергии – и в самих микроорганизмах, и в окружающем пространстве. Это инициирует химические, электрохимические и биокоррозионные процессы разрушения материалов. Следовательно, явление коррозии представляется как система взаимосвязанных микробиологических и физико-химических процессов разрушения материалов, возникающая при взаимодействии их с микрофлорой контактных техногенных сред и окружающей среды. На основании обобщения и анализа результатов научно-исследовательских работ и с учетом известных достижений и открытий в области науки и техники авторы статьи предлагают новый системный подход и концепцию к явлению коррозионного разрушения твердого тела с учетом биологического фактора, инициирующего коррозионное повреждение и разрушение материалов.

Ключевые слова: биологический фактор, биокоррозионные процессы, микроструктура контактных поверхностей, твердые тела, коррозионная система, разрушение материала

Для цитирования: Кудина, А. В. Коррозия – биотехническая система разрушения технических объектов, снижающая их качество и надежность / А. В. Кудина, И. О. Соколов // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 512–520. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-512-520>

Corrosion – Biotechnical System for Destruction of Technical Objects Reducing their Quality and Reliability

A. V. Kudina¹⁾, I. O. Sokorov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. It is a well-known fact, that corrosion of materials, as a phenomenon in the nature, is multifaceted, where its origin and development in many respects depend on environment micro-flora. In the modern world, corrosion is considered mainly as the spontaneous destruction of solids caused by chemical and electrochemical processes, developing on a body surface during its interaction with external environment. The essence of corrosion destruction of objects should be studied in aspect of the

Адрес для переписки

Кудина Анна Вячеславовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-11-20
akudina@bntu.by

Address for correspondence

Kudina Anna V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-11-20
akudina@bntu.by

interrelated natural phenomena and processes that constantly occur when an object comes into contact with man-made environments and the environment containing many microorganisms of various genera and species. The accumulation and metabolism of microorganisms in surface defects of solids, when favorable physical, chemical and biological conditions are created in the contact zones, create areas of biocenosis in which metabolites, biogenic elements and chemically active radicals are formed, interacting with the contact surface of the body and the technogenic environment. Such interaction gives rise to the occurrence of both biochemical reactions in microbial cells and bioenergetic mechanisms of energy conversion on the contact surfaces, both in the microorganisms themselves and in the surrounding space. This initiator chemical, electrochemical and bio-corrosion processes of materials destruction. Consequently, the phenomenon of corrosion is presented as a system of interrelated microbiological and physicochemical processes of destruction of materials, arising from their interaction with the micro-flora of contact technogenic media and the environment. Based on the generalization and analysis of the results of the performed research work and taking into account the well known achievements and discoveries in the field of science and technology, the authors of the paper propose a new systematic approach and concept to the phenomenon of corrosive destruction of a solid with the account of the biological factor that initiates corrosion damage and destruction of materials.

Keywords: biological factor, bio-corrosion processes, microstructure of contact surfaces, solids, corrosion system, destruction of material

For citation: Kudina A. V., Sokorov I. O. (2020) Corrosion – Biotechnical System for Destruction of Technical Objects Reducing their Quality and Reliability. *Science and Technique*. 19 (6), 512–520. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-512-520> (in Russian)

Введение

События последнего десятилетия отчетливо показывают, что большинству специалистов-материаловедов, равно как и инженерам широкого профиля, необходимо больше знать и понимать процессы влияния окружающей среды на свойства материалов, включая коррозионное поведение металлов, их сплавов и других материалов, применяемых в технике. В настоящее время коррозионные проблемы в большинстве случаев рассматриваются в общем виде применительно к металлам, для которых они наиболее характерны или технически важны. В науке и нормативных документах [1, 2] коррозия определена как самопроизвольное разрушение твердых тел, вызванное химическими и электрохимическими процессами при их взаимодействии с внешней средой. Установлено также, что коррозионные процессы, вызванные действием макро- и микросреды, приводят к физическому старению металла и сплавов, изменению их структуры и, как правило, к снижению надежности деталей машин и механизмов. Здесь следует отметить, что сущность явления коррозии, взаимосвязь коррозионных процессов с окружающей средой и влияние макро- и микросреды на возникновение и протекание физико-химических реакций в науке и технике представлены в абстрактной форме

познания, дающей обобщенную картину явления.

Коррозия металла заключается в том, что в его поверхностном слое протекают многофазные реакции окисления, в результате которых металл переходит в окисное состояние (ионное), причем этот процесс сопровождается направленным движением заряженных частиц, обусловленным электронами во внешнем контуре и ионами в электролите. Кроме того, установлено, что в условиях трения стальных поверхностей деталей машин и механизмов при коррозии часто наблюдается накопление в металле активного водорода. Подобные явления отмечены при коррозионно-механическом изнашивании в узлах трения и подвижных соединениях деталей машин [3–5]. Из металловедения известно, что у стали, насыщенной водородом, резко снижаются как сопротивление механическим нагрузкам, так и износостойкость, а при тяжелом режиме работы и высоких удельных нагрузках в рабочих деталях машин и механизмов возникают процессы наводороживания, структурного разупрочнения поверхностей и образования микротрещин, что резко уменьшает предел усталости материала и приводит к снижению надежности и долговечности узлов трения машин и технологического оборудования [4, 6, 7].

В конце XX в. в связи с интенсивным развитием науки, техники и новых технологий кор-

розионные процессы, развивающиеся на поверхности твердого тела (металлических и неметаллических материалов), стали объектом исследования не только материаловедов и электрохимиков, но и микробиологов. Такой повышенный интерес к физической сущности коррозионных процессов вызван новыми открытиями и достижениями в области микробиологии и биотехнологии. В связи с тем, что коррозионные разрушения происходят в результате химического превращения металлов при взаимодействии их с окружающей средой, содержащей множество различных видов микроорганизмов, для более правильного понимания кинетики коррозионных процессов необходимо знать не только основы химии и электрохимии, но и микробиологии.

Цель настоящей работы – на основании обобщения результатов научно-исследовательских работ и с учетом известных научных достижений и открытий в области биофизики и биохимии предложить новый научный системный подход и концепцию к явлению коррозионного разрушения твердого тела с учетом биологического фактора, постоянно присутствующего в окружающем пространстве.

Основная часть

Роль биологического фактора в коррозии металлов и различных неметаллических материалов нельзя недооценивать. Микробному разрушению подвергается практически все, что нас окружает: металл, бетон, стекло, камень, резина, кожа, текстиль, пластмассы, смазки и др. Взаимодействуя с различными материалами, микроорганизмы и их метаболиты создают особый вид разрушения – биоповреждения. Процессы биоповреждений по своему механизму различны и зависят как от биофактора, так и от особенностей подверженного их действию объекта. Как научный, так и инженерный подходы к биокоррозии необходимы для эффективной диагностики коррозионных разрушений с целью разработки механизма и соответствующих средств защиты от этого явления. Разновидность типов и видов микробной коррозии, как металлов, так и защитных материалов, свидетельствует о необычайно широком распространении этого явления в раз-

личных сферах деятельности человека. Так, рабочие органы сельскохозяйственных машин работают в постоянном контакте с возделываемыми техническими культурами (масличными, крахмало- и сахароносами, красильными и проч.). Эти растения в процессе измельчения выделяют в окружающее пространство, в том числе и на детали машин, микроэлементы органических и химических соединений, являющиеся питательной средой для различного рода микроорганизмов. При усвоении последними питательной среды извлекаются нужные вещества и энергия, используемые для построения живой клетки и поддержания ее метаболизма. Продукты распада, ненужные организму, выделяются в окружающее пространство. В большинстве случаев продукты распада и деструкции живых микроорганизмов являются химически активными элементами и свободными радикалами [8–11], которые вовлекаются в электрохимические и химические процессы, тем самым интенсифицируя коррозионные повреждения и разрушения деталей рабочих органов машин и механизмов. Кроме того, микроорганизмы могут воздействовать на отдельные материалы и металлы чисто специфически – они способны потреблять их в качестве источников питания. На рис. 1 представлены крепежные детали элементов технологического оборудования производств микробиологического синтеза, разрушенные микробной коррозией, которая протекает в контактных зонах металлоповерхностей с техногенной средой, содержащей литотрофные бактерии (тионовые и сульфатредуцирующие), после четырех месяцев эксплуатации [8].

Как правило, в коррозионных процессах участвуют микроорганизмы, относящиеся к широкому кругу родов и видов. Это могут быть бактерии, образующие кислоты, а также грибы и водоросли. Во всех сферах производства окружающая среда – неистощимый источник различных микроорганизмов и одновременно обильная питательная среда для их жизнедеятельности. Такие благоприятные условия способствуют протеканию на пятнах контакта (твердое тело – биосреда) микробной коррозии в скрытых или явно выраженных формах. Причем в результате жизнедеятельности микроор-

ганизмов при метаболизме сильно растормаживаются наиболее затрудненные этапы коррозионного процесса [7].

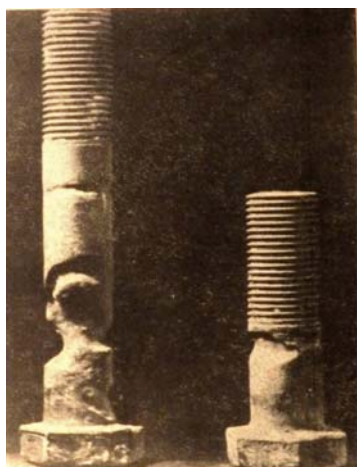


Рис. 1. Детали элементов, разрушенных микробной коррозией при контакте их с техногенной средой, содержащей тионовые и сульфатредуцирующие бактерии

Fig. 1. Details of elements destroyed by microbial corrosion when they come into contact with a technogenic environment containing thionic and sulfate-reducing bacteria

Коррозия материалов, как явление в природе, носит многогранный характер, где ее зарождение и развитие часто следует отнести к микроорганизмам – как аэробам, так и анаэробам. Аэробная коррозия протекает при достаточном количестве свободного или растворенного в воде кислорода. Анаэробная коррозия наблюдается в труднодоступных зонах без кислорода в условиях, которые создаются в почвах и на сильно загрязненных органическими веществами поверхностях, при переработке растительных и животных отходов сельскохозяйственного производства и проч. Известно, что среда, где происходит анаэробная коррозия железа и стали, содержит значительное количество сульфатредуцирующих бактерий [6–8]. Эти бактерии используют поляризованный водород с поверхности металла для своих диссимиляторных процессов, т. е. для сульфатредукции. Способность сульфатредуцирующих бактерий осуществлять катодную деполяризацию зависит от способности усваивать элементарный водород в процессе метаболизма, т. е. от гидрогеназной активности. Катодная реакция, связанная с использованием водорода бактериями, происходит на суль-

фиде железа, который образуется в результате взаимодействия ионов железа с ионами биогенного гидросульфида. Благодаря гидрогеназной активности бактерий водород уходит, и катодная функция сульфида железа восстанавливается.

Дефекты от коррозии грибами разнообразны: деформация материалов, усиление диффузии жидкостей через изоляционные материалы, ускорение коррозии металлов, снижение электроизоляционных свойств материалов, изменение свойств и порча топлива и др. Кроме прямой деградации изделий (неметаллические материалы), грибы способны образовывать мицелии на металлоповерхностях путем их обрастания с последующим повреждением и разрушением материалов. Повреждения и разрушения различных материалов грибами являются сложными процессами, происходящими в силу способности гиф грибов к непосредственному внедрению в материал вследствие высокого давления их верхушечных клеток, а также прямого и косвенного влияния образуемых грибами продуктов. Группа грибов, повреждающих металлы и неметаллические изделия, наименее изучена. Причина этого – господствующее до недавнего времени представление о том, что биоповреждение металлов вызывается главным образом автотрофными и гетеротрофными бактериями [3–5]. Грибы воздействуют на материалы нередко в экстремальных условиях посредством различных механизмов. В процессе роста на разных материалах у грибов активизируется система окислительных оксидаз, выделяются продукты окисления – органические кислоты, которые создают условия для химической или электрохимической коррозии.

Микробная коррозия металлов (бактериальная и грибная) является частью актуальной проблемы существования металлов в природе, от которой зависит долговечность металлов и других материалов, в значительной степени обуславливаемая микробиологическими аспектами [9–11]. Микробиологические проблемы существования металлов в биосфере следует рассматривать с двух позиций:

– токсическое влияние металлов на жизнедеятельность микроорганизмов;

– трансформация металлов под воздействием микроорганизмов и продуктов их метаболизма.

Многочисленность и разнообразие основных видов микробной коррозии металлов и защитных материалов свидетельствуют о необычайно широком распространении этого явления в различных сферах деятельности человека. На рис. 2 представлены фотографии потерявших работоспособность деталей (защитные втулки насосов для перекачивания техногенной биосреды), рабочие поверхности которых подверглись микробной коррозии в условиях коррозионно-механического изнашивания в течение шести месяцев при контакте с техногенной биологически активной средой [12].

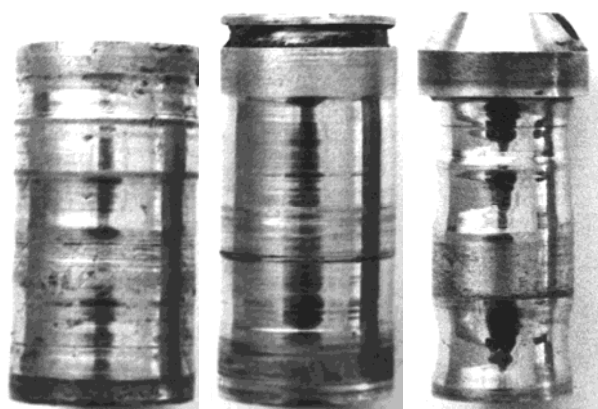


Рис. 2. Фотографии деталей, подвергшихся коррозионно-механическому изнашиванию при воздействии биологического фактора

Fig. 2. Photographs of parts subject to mechanical corrosion wear when exposed to a biological factor

Эффекты коррозионного разрушения при участии различных родов и видов микроорганизмов схожи с другими видами коррозии. Например, существует схожесть с локальной сосредоточенной коррозией: в результате биоповреждений образуются блестящие или шероховатые плоские незначительные углубления под загрязнениями или тонкие окисные пленки, а также раковины различных размеров под слоем продуктов коррозионного разрушения [7].

Микробная коррозия протекает, как правило, двумя путями:

– непосредственного воздействия продуктов деструкции и метаболизма микроорганизмов (CO_2 , H_2S , NH_3 , H^+ , органические и неорганические кислоты) на металлические и неметаллические изделия;

– образования органических продуктов, действующих как деполяризаторы или катализаторы коррозионных реакций, при которых коррозионные процессы являются отдельной частью метаболического цикла бактерий.

В большинстве случаев микроорганизмы способствуют созданию агрессивных сред, в которых ускоряются коррозионные реакции. Изучение закономерностей превращения металлов под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов имеет не только научное, но и практическое значение, так как позволяет понимать сущность коррозионных процессов, резко увеличивающих в металлах скорость роста усталостных трещин, снижающих водородостойкость и циклическую стойкость к трещинообразованию, а знание этого дает возможность находить методы борьбы с коррозией [5, 6, 13].

Процессы биологических повреждений материалов в конкретных условиях вызываются различными родами и видами микроорганизмов или их смешанными колониями. В естественных условиях обитания микроорганизмы живут и проявляют свою активность, как правило, в ассоциациях, размер и состав которых может изменяться при воздействиях на биосферу новых материалов и веществ [3–5]. Поэтому с точки зрения технологических проблем важно создавать новые материалы, которые в составе изделий служили бы требуемый период эксплуатации без текущего и последующего повреждающего действия биофакторов, приводящих к повреждениям и отказам. В настоящее время известно и доказано, что в условиях протекания коррозионно-механического изнашивания разрушающее действие на металлы оказывает присутствие в среде водорода. Исследования структуры поверхностного слоя металла деталей узла трения скребкового транспортера для уборки навоза сельскохозяйственных животных [12, 14] до и после их функционирования показали (рис. 3), что структура поверхности заводской детали (рис. 3а) является цельной и однородной без внутренних дефектов, а в структуре поверхностного слоя металла аналогичной детали, выработавшей свой ресурс (рис. 3б), наблюдаются существенные следы биокорро-

зионного разрушения поверхностного слоя. Они представляют собой суб- и микротрещины, раковины и каверны, в которых легко накапливаются выделяющиеся при коррозии химически активные радикалы, метаболиты и газы, в том числе и адсорбционный водород. Накапливаясь в межкристаллитном пространстве, адсорбционный водород осуществляет наводороживание поверхностного слоя металла и создает высокие удельные давления в местах его концентрации по всему объему материала.

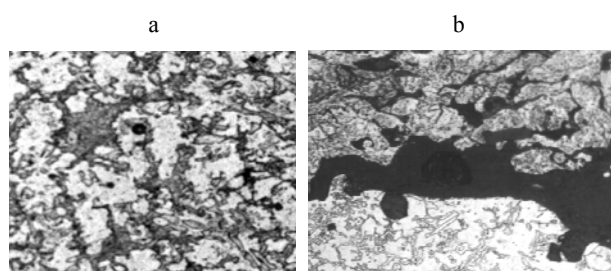


Рис. 3. Структура металлоповерхности детали узла трения транспортера по уборке навоза животных, $\times 100$: а – поверхность детали заводского изготовления (до биоразрушения); б – поверхность детали, выработавшей ресурс (после биокоррозии)

Fig. 3. Metal surface structure of friction unit part in conveyor for cleaning animal manure, $\times 100$: а – surface of plant-made part (before bio-degradation); б – surface of worn-out part (after bio-corrosion)

Известно, что увеличение содержания водорода в углеродистой стали вызывает уменьшение сил межатомного взаимодействия и тем самым понижает его прочность на отрыв σ_b [5]. Прижизненная активность микроорганизмов приводит к нежелательным изменениям свойств материалов, происходящим под действием микробиологической коррозии. Результатом микробной коррозии металлов является биоповреждаемость рабочих поверхностей деталей, ведущая к снижению эксплуатационной надежности деталей машин и технологического оборудования.

Механизм биоповреждений металлов имеет отличительные особенности, связанные с попаданием микроорганизмов на поверхность деталей оборудования, адсорбцией их и загрязнением поверхностей, с образованием микроколоний микроорганизмов, накоплением продуктов их метаболизма, дальнейшим стимулированием электрохимической коррозии металлов, эффектами синергизма и т. п. Физические

и физико-химические явления, протекающие в живых организмах, а также регуляция процессов трансформации энергии в биологических структурах убедительно показывают [14–17], что все живые микроорганизмы в тканях и клетках несут биоэлектрические потенциалы (согласно теории физиолога и основоположника экспериментальной электрофизиологии Л. Гальвани – «животное электричество»), чем создают в зонах контакта с твердым телом электромагнитные поля. При контакте металлов с окружающей средой (техногенная жидкость, смазка, влага и т. д.) в зоне между контактирующими средами (металл – электролит) возникает разность потенциалов, что инициирует развитие биохимических процессов и физико-химических явлений, активизирующих в контактных зонах процессы коррозионного разрушения твердых тел. Последовательность протекания процесса коррозионного повреждения и разрушения материалов может быть представлена следующими этапами.

Первый этап – попадание микроорганизмов на поверхности деталей. Возможен перенос микроорганизмов посредством перемещения воздушных потоков, несущих бактерии, актиномицетов, мицелий и спор грибов. Нельзя исключать из рассмотрения перенос микроорганизмов и загрязнений на поверхности эксплуатируемых металлоконструкций насекомыми. Велика вероятность переноса микроорганизмов технологического характера с загрязненных поверхностей деталей при сборке изделий в условиях производства или при их ремонте, возможны также переносы микробов и другой природы.

На втором этапе коррозионного повреждения происходит адсорбция микроорганизмов и загрязнений на поверхности деталей машин и оборудования. Процесс адсорбции является сложным и зависит от строения и свойств конкретных микроорганизмов, характера поверхности, степени ее шероховатости, состояния среды (наличия питательных сред, климатических условий, водородного показателя pH), характера контакта между микроорганизмами, характера загрязнения материалов. Известно, что многие микроорганизмы имеют строение, позволяющее им достаточно прочно прикрепляться к различным поверхностям [16, 17].

Третий этап коррозионного повреждения – образование микроколоний бактерий или грибов, их рост, сопровождаемый появлением коррозионно-активных метаболитических продуктов и локальным накоплением электролитов с избыточным содержанием гидроксония H_3O^+ . Состав процесса биоценоза и эффект повреждения материалов определяют объем и наличие субстрата для заселения микроорганизмами.

Четвертый этап – накопление продуктов жизнедеятельности микроорганизмов (метаболитов), образующихся на контактных поверхностях, которое представляет значительную опасность, особенно в сопряженных деталях, так как эти накопления способствуют возникновению схватывания поверхностей, интенсивному изнашиванию, что, в свою очередь, снижает работоспособность деталей.

Пятый – стимулирование процессов коррозионного разрушения, т. е. явление, сопутствующее биоповреждениям. Участие в процессе коррозии микроорганизмов снимает известные ограничения по условиям ее протекания (температуре и влажности). Бактерии стимулируют процессы биокоррозии в широких интервалах температур. Например, стимулирование старения различных полимерных материалов происходит, как правило, в направлении усиления химической деструкции продуктами жизнедеятельности и непосредственным потреблением микроорганизмами продуктов разрушения полимерных цепей. Некоторые микроорганизмы воздействуют на материалы окислительными ферментами. К таким ферментам относят оксидоредуктазы (дегидрогеназы, флавиновые ферменты, оксидазы), гидролазы (эстеразы, сульфэстеразы) и др.

Шестой этап (синергизм биоповреждений) происходит как суммарный результат воздействия целого ряда факторов и взаимного стимулирования процессов разрушения: коррозии, старения, изнашивания и прочего, а также развития биоценоза. Характер и интенсивность биоповреждений имеют прямую зависимость от адаптации и видового отбора колоний микроорганизмов. Высокая приспособляемость микроорганизмов к условиям среды обитания существенно затрудняет получение биостойких материалов на длительный период време-

ни, что затрудняет разработку и унификацию защитных средств от биоповреждений. Борьба с биокоррозией на этом этапе носит запоздалый характер, где совместно протекают биокоррозионные процессы и стремительно интенсифицируются процессы химической коррозии. Причем различные этапы коррозионного поражения и разрушения могут протекать одновременно, а если детали машин и оборудования подвержены высоким удельным давлениям, то процессы коррозионного разрушения развиваются непредсказуемо.

ВЫВОДЫ

1. В современной науке явление коррозии рассматривается в основном как самопроизвольное разрушение твердых тел, вызванное химическими и электрохимическими процессами, развивающимися как на поверхности тела, так и внутри его при взаимодействии с внешней средой. Однако это не позволяет полностью изучить и раскрыть все многообразие и сущность явления и процессов коррозии, приводящих к разрушению структуры конструкционных материалов при контакте с окружающим пространством и снижению надежности деталей машин и механизмов. Поэтому сущность коррозионного разрушения объектов следует изучать в аспекте взаимосвязанных природных явлений и процессов, которые постоянно протекают при контакте исследуемого объекта с техногенными средами и окружающей средой, содержащими множество микроорганизмов различных родов и видов.

2. Накопление и метаболизм микроорганизмов в поверхностных дефектах твердых тел при создании в них благоприятных физических, химических и биологических условий создают участки биоценоза, в которых возникают взаимодействия продуктов метаболизма клеток организмов с контактной поверхностью тела и техногенной средой. Такое взаимодействие в контактной зоне порождает протекание на поверхности тел как биохимических реакций в микробных клетках, так и биоэнергетических механизмов преобразования энергии в процессах жизнедеятельности самих организмов, которые инициируют химические, электрохими-

ческие и биокоррозионные процессы разрушения материалов.

3. Кинетика коррозионного повреждения и разрушения материалов представляется в следующем виде: микроорганизмы из окружающего пространства или контактирующих (техногенных) сред накапливаются в микродефектах поверхностного слоя материала, чем создают локальные точки и зоны микробиологической, химической и физико-механической активности, в которых протекают процессы микробного образования колоний, клеточный метаболизм, биохимическая трансформация и деструкция клеток организмов, выделение химически активных радикалов и элементов. Окружающее пространство заполняется продуктами метаболизма клеток (активными химическими радикалами и биогенными элементами), которые адсорбируются материалом и, проникая в контактное твердое тело, разрыхляют его структуру путем разупрочнения межатомных и межкристаллических связей. С разрыхлением поверхности интенсифицируются коррозионные процессы разрушения материалов: создаются новые очаги коррозионного поражения, активизируются физические, химические и электрохимические процессы, происходит структурная деструкция материала и его разрушение.

4. На основании известных научных работ и анализа выполненных научных исследований можно считать, что коррозия материалов – это система взаимосвязанных микробиологических и физико-химических процессов разрушения материалов, возникающая при взаимодействии их с микрофлорой техногенных сред и окружающего пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Corrosion of Metals and Alloys. Basic Terms and Definitions: ISO 8044:2015.
2. Коррозия металлов. Термины: ГОСТ 5272–68. Введ. 01.01.1969. Москва: Издательство стандартов, 1999. 48 с.
3. Наводороживание и разрушение структуры стальных деталей машин и механизмов в водородосодержащих средах / Н. В. Спиридонов [и др.] // Наука и техника. 2014. № 2. С. 72–77.
4. Гаркунов, Д. Н. Виды трения, изнашивания и эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П. И. Корник, Э. Л. Мельников // Ремонт, восстановление, модернизация. 2007. № 7. С. 43–49.
5. Механика разрушений и прочность материалов: справочное пособие в 4-х т. / О. Н. Романив [и др.]; под ред. В. В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1990. Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. 680 с.
6. Ивашко, В. С. Надежность технических систем / В. С. Ивашко, В. В. Кураш, А. В. Кудина. Минск: Изд-во БГАТУ, 2008. 147с.
7. Ивашко, В. С. Теоретические аспекты кинетики изнашивания поверхностей деталей машин и механизмов / В. С. Ивашко, В. В. Кураш, А. В. Кудина // Вестник Белорусского национального технического университета. 2005. № 5. С. 59–63.
8. Ивашко, В. С. Разрушение микроорганизмами материалов деталей машин и механизмов по производству и переработке сельхозпродукции / В. С. Ивашко, В. В. Кураш, А. В. Кудина // Агропанорама. 2007. № 2. С. 36–40.
9. Кудина, А. В. Биокоррозия как существенный фактор, влияющий на качество деталей машин и оборудования по производству и переработке сельскохозяйственной продукции / А. В. Кудина, Л. Е. Процко, И. О. Соколов // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сб-к статей III Междунар. науч.-практ. конф., 23–24 марта 2017г. Минск: Изд-во БГАТУ, 2017. С. 250–253.
10. Гусев, М. В. Микробиология / М. В. Гусев, Л. А. Минеева. М.: Изд. центр «Академия», 2003. 464с.
11. Микробиология: учебник для агротехнологов / О. Д. Сидоренко [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2005. 287с.
12. Кураш, В. В. Механизм биоповреждений и наводороживания деталей машин и оборудования сельскохозяйственного производства / В. В. Кураш, А. В. Кудина, А. В. Лизун // Агропанорама. 2011. № 4. С. 6–10.
13. Технологическое обеспечение качества и надежности деталей узлов трения машин и механизмов / А. В. Кудина [и др.] // Машиностроение: Республиканский межведом. сборник науч. тр. Минск, 2017. Вып. 30. С. 138–142.
14. Кудина, А. В. Снижение качества деталей машин и технологического оборудования в животноводстве при наводороживании металла техногенной биосредой / А. В. Кудина, В. С. Ивашко // Агропанорама. 2017. № 2. С. 8–11.
15. Спиридонов, Н. В. Влияние лазерной обработки на структурно-фазовый состав напыленных Ni–Cr–B–Si-покрытий / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, А. В. Кудина // Вестник Белорусского национального технического университета. 2007. № 3. С. 22–25.
16. Розниченко, Г. Ю. Физико-химические механизмы и регуляция процессов трансформации энергии в биологических структурах / Г. Ю. Розниченко, А. Б. Рубин; под ред. Г. Ю. Розниченко. Ижевск: Изд-во ИКИ, 2017. 526 с.
17. Рубин, А. Б. Биофизика клеточных процессов. Биофизика мембранных процессов: в 3-х т. / А. Б. Рубин. Ижевск: Изд-во ИКИ, 2013. Т. 2. 384 с.

Поступила 19.03.2020

Подписана в печать 09.06.2020

Опубликована онлайн 30.11.2020

REFERENCES

1. *Corrosion of Metals and Alloys. Basic Terms and Definitions*: ISO 8044:2015.
2. All-Union State Standard 5272–68. *Corrosion of Metals. Terms*. Moscow, Izdatel'stvo Standartov Publ., 1999. 48 (in Russian).
3. Spiridonov N. V., Ivashko V. S., Kudina A. V., Kurash V. V. (2014) Hydrogen Absorption and Structure Destruction of Machinery and Mechanism Steel Parts in Hydrogen-containing Medium. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (2), 72–77 (in Russian).
4. Garkunov D. N., Kornick P. I., Melnikov E. L. (2007) Types of Friction, Wear and Operational Damage to Machine Parts. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya = Repair, Reconditioning, Modernization*, (7), 43–49 (in Russian).
5. Romaniv O. N., Yarema S. Ya., Nikiforchin G. N. [et al.] (1990) *Fracture Mechanics and Strength of Materials. Vol. 4: Fatigue and Cyclic Crack Resistance of Structural Materials*. Kiev, Navukova Dumka Publ. 680 (in Russian).
6. Ivashko V. S., Kurash V. V., Kudina A. V. (2008) Reliability of Technical Systems. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University. 147 (in Russian).
7. Ivashko V. S., Kurash V. V., Kudina A. V. (2005) Theoretical Kinetics Aspects of Machine Part and Mechanism Surface Wear. *Vestnik Belorusskogo Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Proceedings of Belarusian National Technical University], (5), 59–63 (in Russian).
8. Ivashko V. S., Kurash V. V., Kudina A. V. (2007) Microorganism Destruction of Materials of Machine Parts and Mechanisms for Production and Processing of Agricultural Products. *Agropanorama*, (2), 36–40 (in Russian).
9. Kudina A. V., Protsko L. E., Sokorov I. O. (2017) Biocorrosion as a Significant Factor Affecting the Quality of Parts of Machinery and Equipment for the Production and Processing of Agricultural Products. *Pererabotka i Upravlenie Kachestvom Sel'skokhozyaistvennoi Produktzii: Sb. Statei III Mezhdunar. Nauch.-Prakt.Konf., 23–24 Marta 2017g.* [Processing and Quality Management of Agricultural Products. Collected Papers of the III International Scientific and Practical Conference, March 23–24, 2017]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 250–253 (in Russian).
10. Gusev M. V., Mineeva L. A. (2003) *Micro-Biology*. Moscow, Akademiya Publ. 464 (in Russian).
11. Sidorenko O. D., Borisenko E. G., Van'kova A. A., Voino L. I. (2005) *Micro-Biology*. Moscow, INFRA-M Publ. 287 (in Russian).
12. Kurash V. V., Kudina A. V., Lizun A. V. (2011) Mechanism of Bio Damage and Hydrogenation of Parts of Machinery and Equipment for Agricultural Production. *Agropanorama*, (4), 6–10 (in Russian).
13. Kudina A. V., Kapitsa M. S., Sokorov I. O., Spiridonov N. V. (2017) Technological Assurance of quality and Reliability in Parts of Machine and Mechanism Frictionunits. *Mashinostroenie: Respublikanskii Mezhvedomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Mechanical Engineering. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Is. 30, 138–142 (in Russian).
14. Kudina A. V., Ivashko V. S. (2017) Decrease in the Quality of Machine Parts and Technological Equipment in Animal Husbandry During Hydrogenation of Metal with a Technogenic Biological Environment. *Agropanorama*, (2), 8–11 (in Russian).
15. Spiridonov N. V., Sokorov I. O., Kudina A. V. (2007) Influence of Laser Treatment on the Structural-Phase Composition of Deposited Ni–Cr–B–Si-Coatings. *Vestnik Belorusskogo Natsionalnogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Proceedings of Belarusian National Technical University], (3), 22–25 (in Russian).
16. Roznichenko G. Yu., Rubin A. B. (2017) *Physico Chemical Mechanisms and Regulation of Energy Transformation Processes in Biological Structures*. Izhevsk, Publishing House of Institute for Computer Research. 526 (in Russian).
17. Rubin A. B. (2013) *Biophysics of Cellular Processes. Biophysics of Membrane Processes. Vol. 3*. Izhevsk, Publishing House of Institute for Computer Research. 384 (in Russian).

Received: 19.03.2020

Accepted: 09.06.2020

Published online: 30.11.2020